

Framework Multicritério CRITIC–WISP para Planejamento Sustentável de Vertiportos na Mobilidade Aérea Urbana: Análise Operacional, Socioambiental e Decisória

Silmara Scontre - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF)
silmarascontre@id.uff.br

Thiago Fernandes Lima – ESCOLA NAVAL (EN)
fernandes_lima81@yahoo.com.br

Marcos dos Santos - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF)
marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br

Resumo

A Mobilidade Aérea Urbana (*Urban Air Mobility-UAM*) emergiu como uma alternativa estratégica para mitigar os desafios de congestionamento e sustentabilidade nas grandes cidades. No entanto, a implementação de vertiportos, infraestrutura essencial para operação de aeronaves elétricas de pouso e decolagem vertical (*eVTOL*), representa um desafio sociotécnico complexo, que envolve variáveis regulatórias, econômicas, técnicas e, sobretudo, socioambientais. Este estudo propõe uma estrutura Multicritério Híbrida que integra os métodos CRITIC (*Criteria Importance Through Intercriteria Correlation*) e WISP (*Weighting of Subjective and Objective Factors*) para apoiar a tomada de decisão na seleção da melhor estratégia de implantação de vertiportos sustentáveis em ambiente urbano. São consideradas três alternativas: vertiporto urbano central, periférico/solo e multimodal integrado, avaliadas por cinco critérios: custo, capacidade logística, área de demanda, segurança operacional, ruído percebido e aceitação social. O método CRITIC foi aplicado para determinar os pesos objetivos dos critérios, enquanto o WISP permitiu integrar os julgamentos subjetivos de especialistas. Os resultados apontaram o vertiporto periférico/solo como a alternativa mais vantajosa, com maior desempenho técnico e aceitação comunitária. O estudo contribui para preencher lacunas existentes no planejamento de infraestrutura aérea urbana, oferecendo suporte científico para a gestão pública, agências reguladoras e tomadores de decisão estratégicos.



Palavras-chave: Mobilidade Aérea Urbana, Vertiporto, Sustentabilidade, CRITIC-WISP, Evtol.

Abstract

Urban Air Mobility (UAM) has emerged as a viable alternative for mitigating traffic congestion and addressing sustainability challenges in large metropolitan areas. However, the implementation of vertiports the essential infrastructure for eVTOL (electric vertical takeoff and landing) aircraft presents a complex sociotechnical problem involving regulatory, economic, technical, and socio-environmental dimensions. This study proposes a hybrid multicriteria framework based on an approach that proposes the integration of CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) and WISP (Weighting of Subjective and Objective Factors) to support informed decision-making in the planning and selection of sustainable vertiport configurations. Three alternatives were evaluated: a central urban vertiport, a peripheral/ground-based vertiport capacity of operations and demand in the area, and a multimodal integrated vertiport, using five criteria: cost, logistical capacity, operational safety, perceived noise, and social acceptance. CRITIC was applied to determine objective weights, while WISP enabled the incorporation of subjective assessments from experts. The results indicate that the peripheral/ground vertiport exhibits the highest overall performance, balancing technical feasibility and social acceptance. This study provides scientific support for public management, regulatory agencies, and strategic infrastructure decision-making in the context of emerging urban air mobility systems.

Keywords: Urban Air Mobility, Vertiport, Sustainability, CRITIC-WISP, eVTOL.

1. Introdução

A Mobilidade Aérea Urbana (*Urban Air Mobility - UAM*) tem emergido como um dos principais vetores de transformação do transporte contemporâneo. Impulsionada pelos recentes avanços em aeronaves elétricas de pouso e decolagem vertical (*electric vertical take-off and landing-eVTOLs*), pela saturação das redes terrestres e pelas agendas globais de descarbonização, a UAM constitui um ecossistema sócio técnico no qual tecnologias, regulações, infraestrutura e percepção social interagem de maneira dinâmica, assumem papel central ao integrar operações aéreas ao ambiente urbano, concentrando funções

como embarque, recarga elétrica, manutenção leve e conexão multimodal. Órgãos internacionais, como OACI, NASA, FAA e EASA, reforçam que tais instalações devem se comportar como pequenos aeroportos de alta complexidade, com requisitos rígidos de energia, segurança e fluidez operacional.

A Figura 1 apresenta uma síntese das principais oportunidades e desafios desse novo modal.

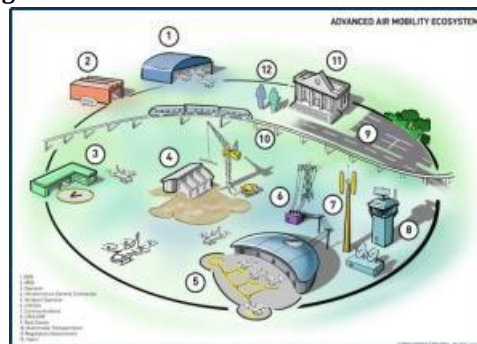
Figura 1 - Novo modal: oportunidades e desafios



Fonte: Lufthansa Consulting

O ecossistema da UAM é composto por múltiplos atores, incluindo operadores, reguladores, gestores urbanos, provedores de energia e agentes imobiliários. A interdependência entre esses agentes, representada na Figura 2, reforça que a viabilidade da UAM depende tanto de soluções tecnológicas quanto de arranjos institucionais capazes de articular interesses e garantir segurança e continuidade operacional.

Figura 2 - Ecossistema da Mobilidade Aérea Urbana



Fonte: SMG Consulting, 2022; adaptado Cecatto, 2024.

No Brasil, o debate tem avançado especialmente na Região Metropolitana de São Paulo, que concentra a maior frota de helicópteros do mundo. Essa característica sugere um ambiente promissor, mas não assegura a adaptação automática dos helipontos existentes. Estudos indicam que grande parte dessas estruturas não poderá atender às exigências de zonas livres de obstáculos, capacidade energética e requisitos de segurança. Conforme demonstrado por

Ayres Jr. (2024), a conversão direta de helipontos em vertiportos raramente é viável sem intervenções profundas.

Além das restrições físicas, existem desafios regulatórios relacionados ao gerenciamento de risco, resposta à emergências, controle de acesso, inspeção de passageiros e protocolos AVSEC. A partir de uma abordagem baseada em risco, Calogero (2024) destaca que vertiportos devem integrar camadas de segurança alinhadas às diretrizes internacionais. Esse percurso regulatório é sintetizado na Figura 3, que apresenta um modelo de sandbox regulatório articulando certificação, operação, infraestrutura e segurança.

Figura 3 - Sandbox regulatório de vertiporto

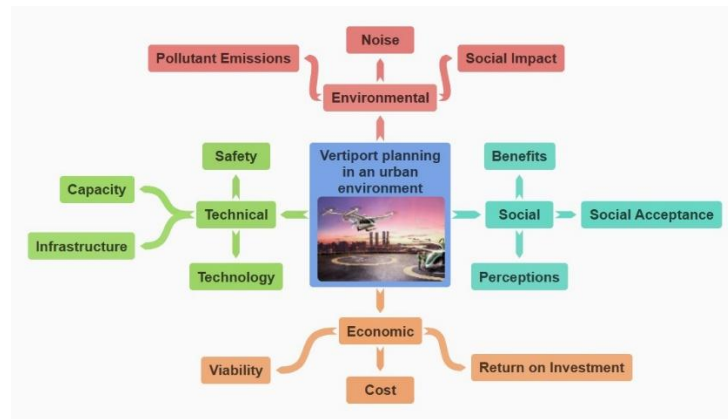


Fonte: AYRES JR. (2024).

Outro vetor importante refere-se à aceitação pública. Pesquisas recentes demonstram que fatores como percepção de risco, ruído, confiabilidade tecnológica e impacto visual influenciam fortemente a legitimação social de operações com eVTOLs. Assim, soluções tecnicamente viáveis podem enfrentar resistência se não forem integradas a estratégias de comunicação e desenho urbano adequadas.

Para estruturar as múltiplas dimensões relevantes no planejamento de vertiportos, foi desenvolvido um Mapa Mental Conceitual (Figura 4), reunindo aspectos ambientais, técnicos, sociais e econômicos, que evidencia a necessidade de ferramentas multicritério capazes de integrar indicadores objetivos e percepções subjetivas.

Figura 4 - Mapa mental dos vetores críticos no planejamento de vertiportos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O estudo propõe uma estrutura Multicritério Híbrida CRITIC–WISP para apoiar a seleção de tipologias sustentáveis de vertiportos para UAM. Enquanto o método CRITIC determina pesos objetivos a partir da variabilidade e correlação entre critérios, o método WISP incorpora julgamentos de especialistas e preferências socioambientais. Essa integração metodológica permite capturar simultaneamente evidências empíricas e percepções qualitativas, refletindo de forma mais fiel a natureza sociotécnica do problema decisório.

Nesse contexto, este estudo contribui para a literatura de três formas principais: propõe um framework híbrido CRITIC–WISP especificamente adaptado ao planejamento de vertiportos em ambientes urbanos densos; integra, de forma estruturada, critérios psicossociais frequentemente negligenciados em modelos técnicos de UAM; e demonstra empiricamente a superioridade de soluções intermodais sob uma perspectiva multicritério socioambiental.

2. Referencial Teórico

2.1 Mobilidade Aérea Urbana: evolução, conceitos e fundamentos internacionais

A Mobilidade Aérea Urbana é definida como um sistema integrado de transporte aéreo em baixa altura, utilizando aeronaves de pequeno porte, para deslocamentos de curta e média distância em ambiente urbano ou peri-urbano. A literatura destaca a UAM como resposta aos desafios de congestionamento, emissões e ineficiência dos sistemas de transporte terrestres, mas também enfatiza suas incertezas regulatórias, tecnológicas e sociais (Brunelli; Ditta; Postorino, 2023; Wu *et al.*, 2021).

Do ponto de vista conceitual, a UAM articula dimensões operacionais (rota, frota, demanda), regulatórias (certificação de aeronaves, gestão do espaço aéreo, requisitos de segurança), energéticas (infraestrutura de recarga, gestão da demanda elétrica), ambientais (emissões, ruído, ocupação do solo) e sociais (aceitação, percepção de risco, acessibilidade). Di Mascio *et al.* (2022) apontam que a maturidade da UAM depende da convergência entre esses elementos, de forma análoga à evolução histórica de sistemas ferroviários e metroviários, mas com desafios adicionais decorrentes do uso compartilhado do espaço aéreo urbano.

A aceitação pública, em particular, tem sido tratada como variável crítica. Estudos empíricos indicam que percepção de ruído, confiabilidade, privacidade e impacto visual são determinantes na disposição dos cidadãos em aceitar operações de eVTOL em seus bairros (Al Haddad *et al.*, 2020; Muhlhausen *et al.*, 2023), onde apresentam implicações diretas para o planejamento de vertiportos, uma vez que decisões técnicas, como altura de voo ou localização da infraestrutura, podem ser reconfiguradas por fatores psicossociais.

Embora organismos como OACI, EASA, FAA e NASA já tenham publicado diretrizes para operações UAM e vertiportos, a literatura científica aponta que a consolidação do sistema dependerá da integração entre modelos de negócio, planejamento urbano e mecanismos de governança colaborativa (Pan; Luo; Chen, 2021; Santos *et al.*, 2024). Nesse sentido, estruturas multicritério tornam-se essenciais para equilibrar os diferentes objetivos e restrições presentes em cenários urbanos complexos.

2.2 Vertiportos: definições, requisitos técnicos, arquiteturas e desafios

Vertiportos são infraestruturas dedicadas à operação de eVTOLs, onde ocorrem pousos e decolagens, processamento de passageiros, recarga de baterias, manutenção e integração com outros modais de transporte. O desenho de vertiportos deve considerar características do tecido urbano, restrições de uso do solo, corredores de tráfego aéreo, requisitos energéticos e zonas de ruído (Di Mascio *et al.*, 2022; Postorino; Gori, 2020).

A localização de vertiportos configura um problema classicamente multicritério: densidade populacional, acessibilidade, impacto acústico, risco operacional, disponibilidade de espaço físico e compatibilidade com o zoneamento urbano são alguns dos fatores que precisam ser considerados simultaneamente (Brunelli *et al.*, 2023; Bauranov; Rakas, 2021). A EASA (2022) organiza esses requisitos em três dimensões centrais: infraestrutura física (controle do tráfego aéreo, rotas de aproximação, recarga, hangares); infraestrutura tecnológica (comunicação, sensores, automação de fluxo, integração com sistemas UTM); e integração urbana (uso do solo, ruído, acessibilidade, conectividade modal).

Ayres Jr. (2024), no Brasil, discute a tipologia funcional de vertiportos para a Região Metropolitana de São Paulo, destacando três configurações (Figura 5): vertiporto urbano central (rooftop em áreas densas), vertiporto periférico em solo (áreas de expansão operacional) e vertiporto multimodal integrado (hubs intermodais). Cada tipologia apresenta vantagens e limitações de custo, capacidade, segurança operacional, ruído e aceitação social, reforçando a necessidade de um modelo analítico estruturado para compará-las.

Figura 5 - Tipologia funcional de vertiportos



Fonte: Adaptado de NASA (2020)

2.1 Segurança Operacional e AVSEC aplicados a vertiportos

A segurança operacional é um eixo crítico para a viabilidade da UAM. Estudos discutem modelos de risco para operações de eVTOL em ambiente urbano, considerando falhas de sistema, interferência com edificações, condições meteorológicas adversas e interação com outros modais (Liu; Hu; Chen, 2022; Hall *et al.*, 2021). A introdução de aeronaves com elevado grau de automação adiciona novas fontes de incerteza, demandando abordagens de segurança baseadas em desempenho (performance-based) e em risco.

No Brasil, a ANAC tem avançado na discussão de requisitos aplicáveis a vertiportos, destacando a necessidade de avaliação de ameaças e vulnerabilidades, classificação de risco operacional, controle de acessos, zonas restritas e planos de contingência. Documentos AVSEC, embora focados em segurança da aviação civil, vêm sendo utilizados como referência para a concepção de vertiportos, sobretudo no que diz respeito à proteção contra atos ilícitos e à gestão de fluxos de passageiros e bagagens. Estudos atuais incorporaram riscos associados a falhas energéticas, interação com o entorno urbano, colisões com obstáculos e comportamento dos usuários. Santos e Carvalho (2022) defendem que sistemas emergentes de aviação em ambiente urbano requerem modelos de gestão de risco baseados

em pensamento sistêmico e em métodos multicritério, capazes de articular dimensões técnicas, regulatórias e sociais.

2.3 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Métodos multicritério de apoio a tomada de decisão (MCDA) são amplamente utilizados em problemas de infraestrutura, planejamento urbano e transporte, por lidarem com situações em que múltiplos critérios, conflitantes e que precisam ser considerados de forma simultânea (Diakoulaki *et al.*, 1995; Xu; Liu; Zhang, 2020). Para a UAM, esses métodos permitem comparar alternativas de vertiportos com critérios como custo, capacidade, segurança, ruído e aceitação social.

O método CRITIC (*Criteria Importance Through Intercriteria Correlation*) é uma abordagem para determinação de pesos objetivos, baseada na variabilidade dos dados e na correlação entre critérios. Quanto maior a variância de um critério (capacidade discriminatória) e menor sua correlação com os demais (maior informação não redundante), maior será o peso objetivo atribuído. Essa característica torna o CRITIC adequado para problemas em que os critérios possuem escalas distintas e correlações relevantes (Adali; Isik, 2017; Pan *et al.*, 2021).

O método WISP (Weighted Influence Superiority and Inferiority Ranking Method), proposto por Stanujkic *et al.* (2021), destaca-se por integrar pesos objetivos e subjetivos, preservando coerência e monotonicidade nas decisões. O WISP combina elementos de modelos de soma ponderada e produto ponderado, reduzindo distorções associadas à normalização e à dominância de critérios extremos. Sua natureza híbrida permite incorporar julgamentos de especialistas, preferências de stakeholders e pesos derivados de métodos estatísticos, como o CRITIC (Alinezhad; Khalili, 2019; Zavadskas *et al.*, 2022).

2.4 Método CRITIC

O método CRITIC é utilizado para calcular pesos objetivos (W_{obj}) para os critérios custo, capacidade logística, segurança operacional, ruído percebido e aceitação social. A aplicação do método segue etapas clássicas: construção da matriz de decisão, normalização dos dados, cálculo dos desvios padrão, estimativa da matriz de correlação entre critérios, cálculo da informação de cada critério (C_j) e a determinação dos pesos objetivos normalizados. Os resultados indicaram maior importância objetiva para ruído percebido (Critério 4) e aceitação social (Critério 5), evidenciando que critérios psicossociais são centrais para a viabilidade de vertiportos urbanos, capacidade logística (Critério 2), custo (Critério 1) e a segurança (Critério 3), compondo um conjunto sobre UAM e infraestrutura de transporte.

2.4.1 Método WISP

O método WISP (*Weighting of Subjective and Objective Factors*) é utilizado para integrar os pesos objetivos obtidos pelo CRITIC aos pesos subjetivos derivados de especialistas (W_{sub}). Em projetos de infraestrutura com forte impacto social, como vertiportos urbanos, recomenda-se atribuir maior relevância aos aspectos socioambientais e às percepções de stakeholders (ZAVADSKAS *et al.*, 2020; STANUJKIĆ *et al.*, 2021).

Os pesos subjetivos foram obtidos junto a especialistas em engenharia aeronáutica, urbanismo, regulação aérea, sustentabilidade, operação aeroportuária e gestão pública, resultando na matriz de pesos W_{sub} . O WISP combina esses pesos subjetivos com os pesos objetivos do CRITIC por meio de uma combinação linear controlada por um parâmetro β , que expressa o grau de influência subjetiva. Adotou-se a análise de sensibilidade com $\beta = 0,40$; $0,55$ e $0,70$, demonstrando estabilidade do ranking com predominância às opiniões dos especialistas, em consonância com a relevância da aceitação pública e dos impactos socioambientais no contexto da UAM.

A integração CRITIC–WISP gera uma matriz final de pesos (W_j) que fundamenta o ranqueamento das alternativas de vertiportos, equilibrando evidências empíricas e julgamentos experientes em um framework estratégico multicritério.

3. Metodologia

A pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, integrando métodos qualitativos e quantitativos para apoiar a seleção da tipologia de vertiporto mais adequada ao contexto urbano analisado. O método foi estruturado em três etapas principais: estruturação do problema, determinação dos pesos objetivos e subjetivos e avaliação e ranqueamento das alternativas. A contextualização do problema foi realizada por meio do método CATWOE, a aplicação do método CRITIC para obtenção dos pesos objetivos e a integração dos pesos objetivos e subjetivos por meio do método WISP.

3.1 Estruturação do problema por meio do método CATWOE

A etapa de estruturação dos problemas sociotécnicos complexos, como o planejamento de vertiportos para UAM é bem complexa. Para isso, foi aplicado o método CATWOE, originário da *Soft Systems Methodology* (Checkland; Poulter, 2010), que permite identificar, de forma sistemática, os principais agentes (*Customers, Actors*), o processo de

transformação (*Transformation*), a visão de mundo subjacente (*Worldview*), as entidades proprietárias do sistema (*Owners*) e as restrições ambientais (*Environment*).

A aplicação do CATWOE possibilitou mapear atores como usuários potenciais, operadores de eVTOLs, gestores públicos, agências reguladoras, concessionárias de energia e comunidades locais, bem como explicitar as principais restrições institucionais e ambientais. A Tabela 1 sintetiza a representação do CATWOE aplicada ao planejamento de vertiportos, evidenciando que a decisão não se limita a “onde implantar”, mas abrange “como planejar, integrar, certificar e operar” a infraestrutura em ambiente urbano denso.

Tabela 1 - Representação do CATWOE

ELEMENTOS	DESCRIÇÃO
C	• Passageiros • Pilotos de eVTOL • Comunidade • Órgãos públicos
A	• ANAC e DECEA • Prefeituras • Órgãos ambientais • Construtoras de concessionárias • Fabricantes de eVTOL • Operadores de vertiporto
T	• De um sistema urbano congestionado, caro e ambientalmente insustentável para um sistema de mobilidade aérea eficiente, segura, sustentável, integrada e socialmente aceita
W	• A Mobilidade Aérea Urbana é uma infraestrutura estratégica de interesse público, capaz de transformar a dinâmica urbana por meio da integração entre tecnologia, sustentabilidade e legitimidade social.
O	• Órgãos públicos (ANAC, Prefeituras, Ministério do Transporte) • Investidores privados • Agências reguladoras • Concessionárias de infraestrutura • Parcerias Público-Privado (PPP)
E	• Regulação aeronáutica e urbana; limitações espaciais metropolitanas; aceitação pública e ruído percebido; impactos ambientais; infraestrutura elétrica e logística; custos de implantação e operação.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

3.2 Aplicação do método CRITIC

O método CRITIC, proposto por Diakoulaki et al. (1995), é uma abordagem multicritério objetiva que combina a intensidade de contraste dos dados, refletida pela sua dispersão e o grau de conflito entre os critérios medidos pelas correlações. A aplicação do método determina os pesos objetivos dos critérios considerados. Inicialmente, construiu-se a matriz de decisão a partir de dados empíricos referentes às três alternativas de vertiporto (A1- urbano central, A2 - periférico/solo, A3 - multimodal integrado) e aos cinco critérios selecionados (C1- custo, C2 - capacidade, C3 - segurança, C4 - ruído percebido, C5 – aceitação social). A Tabela 2 apresenta a matriz de decisão, com valores em suas unidades originais, obtidos a partir de fontes técnicas como ANAC (2024), NASA (2020) e Ayres Jr. (2023).

Tabela 2 – Matriz de Decisão

Critérios Alternativas	C1: Custo US\$ mi	C2: Capacidade mov./h	C3: Segurança Índice 0-10	C4: Ruído dB	C5: Aceitação Índice 0-1
Monotonicidade	Min	Max	Max	Min	Max
A1: Urbano Central	15,5	10	7,0	72	0.58
A2: Periférico/Solo	5,3	20	6,5	64	0.74
A3: Multimodal	20,8	25	8,5	60	0.82

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados foram então normalizados pelo método min–max reversível, respeitando a natureza de maximização ou minimização de cada critério (custo e ruído como minimização; capacidade, segurança e aceitação como maximização). A Tabela 3 apresenta a matriz normalizada, que constitui a base para o cálculo subsequente dos pesos objetivos.

Para critérios de maximização:

Para critérios de minimização:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

Como exemplo: Minimização de 15,5 milhões (custo)

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} = x_{ij} = \frac{20,8 - 15,5}{20,8 - 5,3} = 0,3419$$

Maximização de 10 mov/h (capacidade operacional)

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} = x_{ij} = \frac{10 - 10}{25 - 10} = 0,000$$

A Tabela 3 apresenta a matriz normalizada, que constitui a base para o cálculo subsequente dos pesos objetivos.

Tabela 3 - Matriz Normalizada

Critérios Alternativas	C1: Custo R\$ mi	C2: Capacidade mov./h	C3: Segurança Índice 0-10	C4: Ruído dB	C5: Aceitação Índice 0-1
A1: Urbano Central	0,3419	0,0000	0,2500	0,0000	0,0000
A2: Periférico/Solo	1,0000	0,6667	0,0000	0,6667	0,6667
A3: Multimodal	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Em seguida, calculou-se o desvio padrão de cada critério, que representa sua capacidade de discriminar as alternativas, conforme apresentado na Tabela 4. Critérios com maior desvio padrão tendem a exercer maior influência objetiva no processo decisório, por diferenciarem mais fortemente as opções analisadas.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$$

Tabela 4 - Desvio Padrão dos Critérios

Critérios	C1: Custo	C2: Capacidade	C3: Segurança	C4: Ruído	C5: Aceitação
σ_j	0.4150	0.4157	0.4249	0.4157	0.4157

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A matriz de correlação (r_{jk}) mede o grau de dependência entre os critérios (Tabela 5), com o objetivo de identificar redundâncias

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}}$$

Tabela 5 - Matriz de Correlação entre Critérios

Critérios	C1: Custo	C2: Capacidade	C3: Segurança	C4: Ruído	C5: Aceitação
C1: Custo	1,0000	1,0000	-0,8953	-0,1523	-0,1523
C2: Capacidade	-0,1523	1,0000	0,5765	1,0000	1,0000
C3: Segurança	-0,8953	0,5767	1,0000	0,5765	0,5765
C4: Ruído	-0,1523	1,0000	0,5765	1,0000	1,0000
C5: Aceitação	-0,1523	1,0000	0,5765	1,0000	1,0000

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Com base no desvio padrão e nas correlações, calculou-se a informação de cada critério (C_j), integrando poder de discriminação e independência relativa. A Tabela 6 apresenta os valores de informação dos critérios, que são então normalizados para obtenção dos pesos objetivos (W_i). Esses pesos refletem a importância estatística de cada critério no sistema decisório, evidenciando maior relevância para ruído percebido (C4) e aceitação social (C5).

$$c_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk})$$

Tabela 6- Cálculo da informação do critério

Crítérios	C1: Custo	C2: Capacidade	C3: Segurança	C4: Ruído	C5: Aceitação
σ_j	0.4150	0.4157	0.4249	0.4157	0.4157
$\sum_{k=1}^n (1 - r_{jk})$	0,3524	0,5778	3,1657	0,5778	0,5778

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O cálculo dos pesos objetivos (W_j), onde os valores de informação (C_j) são normalizados para gerar proporções relativas cuja soma é igual a 1. Os pesos apresentados na tabela 7, refletem a importância estatística de cada critério no sistema decisório, evidenciando maior relevância para ruído percebido (C4) e aceitação social (C5).

$$W_j = \frac{C_j}{\sum C_j}$$

Tabela 7 - Cálculo dos Pesos Objetivos

Crítérios	C1: Custo	C2: Capacidade	C3: Segurança	C4: Ruído	C5: Aceitação
C_j	2.2212	0.6551	1.3452	0.6551	0.6551
W_j	0,4015	0.1184	0.2432	0.1184	0.1184

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O processo metodológico do CRITIC, desde a construção da matriz de decisão até a obtenção dos pesos objetivos, é sintetizado no Fluxograma 1, que organiza graficamente as principais etapas e facilita a replicação do procedimento em outros estudos.

Fluxograma 1 – Fluxograma do Método CRITIC



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.2 Aplicação do método WISP

3.2.1 Integração de pesos subjetivos e objetivos

O método WISP (*Weighting of Subjective and Objective Factors*) foi aplicado para integrar os pesos objetivos derivados do CRITIC aos pesos subjetivos obtidos a partir de especialistas. Esses especialistas atuam nas áreas de engenharia aeronáutica, planejamento urbano, regulação aérea, sustentabilidade, operação aeroportuária e gestão pública. O WISP integra

simultaneamente duas fontes de informação cruciais para a ponderação. A Figura 6 detalha a natureza, fonte e as vantagens específicas de cada tipo de peso considerado na metodologia.

Figura 6 - Integração das fontes de informação para ponderação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

As respostas foram consolidadas e normalizadas, resultando na matriz de pesos subjetivos apresentada na Tabela 8, que confere maior importância à aceitação social (C5) e ao ruído (C4), seguidos por capacidade (C2), segurança (C3) e custo (C1).

Tabela 8 - Pesos Subjetivos Consolidados (*Wsub*)

Crítérios	C1: Custo	C2: Capacidade	C3: Segurança	C4: Ruído	C5: Aceitação
<i>Wj</i>	0.0667	2.0000	1.3333	0.2667	0.3333

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os pesos finais (*Wj*) foram calculados por meio de combinação linear entre *Wsub* e *Wobj*, controlada pelo parâmetro β , que representa o grau de influência subjetiva. Neste estudo, adotou-se $\beta = 0,55$, atribuindo 55% de peso aos julgamentos dos especialistas e 45% aos pesos objetivos. Essa configuração enfatiza os aspectos socioambientais e da aceitação pública em projetos de vertiportos urbanos.

3.2.1 Cálculo do índice final de desempenho das alternativas

Após determinados os pesos finais, calculou-se o Índice de Desempenho Global (*Si*) de cada alternativa, por meio da multiplicação da matriz normalizada de desempenho pelas ponderações *Wj*.

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot x'_i$$

A Tabela 9 apresenta os valores do índice WISP para as três alternativas de vertiporto.

Tabela 9 - Desempenho Final das Alternativas (Índice WISP)

Alternativa	A1: Urbano Central	A2: Periférico/Solo	A3: Multimodal Integrado
Score	0,8044	1,0000	0,8972

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A Tabela 10 organiza o ranqueamento final, acompanhado de observações qualitativas sobre o desempenho de cada tipologia.

Tabela 10: Ranking Final das Alternativas

Ranking	Alternativas	Observações
1 °	A2: Periférico / Solo	Apresentou o melhor equilíbrio global entre menor custo, elevada capacidade operacional, menor ruído e boa aceitação social.
2°	A3: Multimodal Integrado	Destacou-se pelo melhor desempenho em capacidade, segurança, ruído e aceitação social, embora tenha sido penalizada pelo maior custo de implantação.
3°	A1: Urbano Central	Obteve o menor desempenho global em razão do custo elevado, maior nível de ruído e menor aceitação social relativa.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Com esses resultados são interpretadas as implicações operacionais, socioambientais e de planejamento urbano associadas à escolha da tipologia de vertiporto mais adequada.

4. Resultados e Discussão

A aplicação do framework híbrido CRITIC–WISP permitiu avaliar, de forma integrada, o desempenho das três tipologias de vertiporto. A combinação entre pesos objetivos, fundamentados na variabilidade e na correlação dos dados, e pesos subjetivos, derivados do julgamento de especialistas, resultou em uma hierarquização consistente das alternativas. Ainda assim, a ordenação final não deve ser interpretada apenas como um “ranking técnico”, mas como a expressão de trade-offs centrais no debate contemporâneo sobre UAM, especialmente entre eficiência operacional, viabilidade econômica, sustentabilidade socioambiental e legitimidade social.

O vertiporto periférico/solo (A2) foi classificado como a alternativa mais vantajosa, apresentando o maior índice de desempenho global. Esse resultado decorre, sobretudo, de seu perfil mais equilibrado entre os critérios analisados: menor custo, boa capacidade operacional, níveis reduzidos de ruído e aceitação social favorável, ainda que não tenha apresentado o

melhor desempenho em segurança. Sob a ótica multicritério, a vantagem de A2 sugere que a atratividade de uma tipologia de vertiporto não depende apenas de desempenhos máximos em critérios isolados, mas da capacidade de conciliar eficiência, viabilidade de implantação e menor potencial de conflito com o ambiente urbano. Nesse sentido, a alternativa periférica em solo mostra-se particularmente relevante por reduzir barreiras econômicas e socioambientais, configurando-se como uma solução mais robusta para contextos urbanos que demandam equilíbrio entre expansão tecnológica e aceitabilidade pública.

O vertiporto multimodal integrado (A3) ocupou a segunda posição no ranking final. Seu desempenho foi fortemente favorecido pelos resultados superiores em capacidade operacional, segurança, ruído percebido e aceitação social, evidenciando elevado potencial técnico e socioambiental. Contudo, essa alternativa foi penalizada por apresentar o maior custo de implantação, o que reduziu sua vantagem no desempenho global. Esse achado revela uma tensão importante no planejamento da infraestrutura de UAM: soluções tecnicamente mais completas e potencialmente mais articuladas ao sistema de mobilidade urbana tendem a exigir maior investimento inicial, o que pode comprometer sua atratividade sob uma perspectiva de viabilidade econômica. Assim, embora A3 represente uma alternativa altamente qualificada do ponto de vista funcional e sistêmico, seu custo mais elevado limita sua posição no ranking final.

O vertiporto urbano central (A1) apresentou o menor desempenho global entre as alternativas analisadas. Embora a centralidade urbana possa, em princípio, favorecer a proximidade com polos geradores de demanda e reduzir tempos de deslocamento para determinados perfis de usuários, no contexto avaliado essa tipologia mostrou-se menos competitiva. A1 foi desfavorecida principalmente por seu alto custo, menor capacidade operacional, maior nível de ruído percebido e menor aceitação social, além de desempenho apenas intermediário em segurança. Esses resultados indicam que a centralidade, embora potencialmente vantajosa em termos de conveniência e mercado, tende a intensificar restrições técnicas, ambientais e regulatórias, aumentando a exposição da infraestrutura a conflitos urbanos e resistência pública. Evidências de Ayres Jr. (2024) reforçam essa interpretação ao indicar que parte relevante dos helipontos existentes não atende integralmente aos requisitos de segurança para operações com eVTOLs, tornando sua adaptação um desafio técnico e econômico significativo.

Em síntese, os resultados sugerem que as decisões sobre infraestrutura de UAM devem ser compreendidas como escolhas entre diferentes formas de equilibrar desempenho técnico, viabilidade econômica e legitimidade socioambiental. A alternativa periférica/solo (A2) destacou-se justamente por apresentar o conjunto mais equilibrado desses atributos, enquanto a alternativa multimodal integrada (A3) demonstrou elevado potencial, embora restringido por maiores custos de implantação. Já a alternativa urbana central (A1), apesar de sua aparente vantagem locacional, mostrou-se mais vulnerável a conflitos econômicos, ambientais e sociais. Dessa forma, o framework CRITIC–WISP revelou-se adequado para apoiar decisões em problemas multidimensionais e sociotécnicos, ao tornar explícitas as tensões entre os critérios avaliados e permitir que a alternativa mais vantajosa seja interpretada não apenas por sua performance agregada, mas também por sua coerência com objetivos urbanos, regulatórios e sociais.

5. Limitações do Estudo

Apesar das contribuições apresentadas, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, a análise foi conduzida com um número reduzido de alternativas de vertiporto, o que, embora coerente com tipologias recorrentes

na literatura e na prática regulatória, pode limitar a generalização dos achados para contextos urbanos com configurações distintas. Além disso, a dependência de dados secundários, provenientes de fontes técnicas e institucionais, pode introduzir restrições relacionadas à atualização, à granularidade e à padronização das informações utilizadas na construção da matriz de decisão.

Em segundo lugar, a incorporação de pesos subjetivos baseou-se na opinião de um grupo específico de especialistas, o que pode implicar vieses associados à experiência, formação ou contexto institucional desses atores, ainda que procedimentos de consolidação e normalização tenham sido adotados. Por fim, o framework proposto não incorpora uma modelagem dinâmica da demanda ou da evolução temporal da UAM, tratando o problema decisório de forma estática. Estudos futuros podem superar essas limitações ao ampliar o conjunto de alternativas e critérios, empregar dados primários, incorporar técnicas fuzzy ou probabilísticas para tratar incertezas e desenvolver abordagens dinâmicas capazes de capturar a evolução da demanda, da tecnologia e da aceitação social ao longo do tempo.



6. Considerações Finais

Este estudo apresentou um Framework Multicritério Híbrido, baseado nos métodos CRITIC e WISP, para apoiar decisões sobre a implantação de vertiportos na Mobilidade Aérea Urbana. A abordagem demonstrou capacidade de integrar múltiplas dimensões técnico-operacionais, econômicas, ambientais e sociais, oferecendo suporte consistente para cenários decisórios complexos.

Os resultados indicaram que o vertiporto periférico/solo obteve o melhor desempenho global, evidenciando a relevância de soluções intermodais alinhadas ao planejamento urbano sustentável. O uso do CATWOE contribuiu para explicitar atores e restrições, fortalecendo a legitimidade do processo.

Como caminhos futuros, recomenda-se ampliar critérios e alternativas, incorporar técnicas fuzzy para tratar incertezas e desenvolver ferramentas computacionais que permitam análises dinâmicas em tempo real. O framework proposto também pode ser adaptado a outros contextos da UAM, como corredores aéreos, bases de manutenção ou hubs logísticos, oferecendo uma base metodológica aplicável a diversos agentes do ecossistema.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Manuel Ayres Junior e a Prof. Ma Kely Cristina Góis de Azevedo, pelo apoio e pelas relevantes contribuições ao longo da elaboração deste trabalho. Suas observações, conhecimentos e reflexões foram essenciais para o fortalecimento da abordagem teórica e metodológica adotada, enriquecendo de maneira significativa a construção e a qualidade final deste estudo.

8. Referências

- AL HADDAD, C. *et al.* **Urbanairmobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation.** *Transportation Research Part C*, v. 120, p. 102772, 2020.
- ALINEZHAD, A.; KHALILI, J. **New methods and applications in multicriteria decision making.** *International Journal of Applied Decision Sciences*, v. 12, n. 1, p. 1–22, 2019.
- AYRES JR., Manuel. **Vertiportos: desafios regulatórios e operacionais para implantação na Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo: SEESP, 2024.



- BAURANOV, A.; RAKAS, J. **Designing vertiport networks for Urban Air Mobility.** *Transportation Research Part C*, v. 132, p. 103421, 2021.
- BRUNELLI, M.; DITTA, C. C.; POSTORINO, M. **Urban air mobility and vertiport infrastructure: a review of emerging challenges and opportunities.** *Journal of Air Transport Management*, v. 103, 2023. CALOGERO, A. **Vertiport Security & Facilitation - A Risk-Based Approach.** ANAC AAM 2024. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 2024.
- CECUTTA, S. **AAM Readiness Index: Measuring industry progress across key use cases.** ANAC AAM Summit 2024. Brasília, 2024.
- CHECKLAND, P.; POULTER, J. **Soft Systems Methodology.** In: *Systems Approaches to Managing Change*. London: Springer, 2010.
- DI MASCIO, M. *et al.* **Vertiports and regulatory frameworks for Advanced Air Mobility: A systematic review.** *Drones*, v. 6, n. 4, p. 87, 2022.
- DIAKOULAKI, D.; MAVROTAS, G.; PAPAYANNAKIS, L. **Determining objective weights in multicriteria problems: The CRITIC method.** *Computers & Operations Research*, v. 22, n. 7, p. 763–770, 1995.
- HALL, A. *et al.* **Safety risk modeling for Urban Air Mobility operations.** *Journal of Air Transportation*, v. 29, n. 2, p. 45–59, 2021.
- KIM, H.; MAVRIS, D. **An analytical framework for societal acceptance of Urban Air Mobility.** *AIAA Journal of Aircraft*, v. 58, p. 1–17, 2021.
- PAN, B.; LUO, X.; CHEN, Z. **Applications of CRITIC weighting in transportation systems: A comprehensive review.** *Transportation Research Review*, v. 12, p. 201–220, 2021.
- POSTORINO, M.; GORI, S. **Air transport infrastructures in the era of Urban Air Mobility: Models, challenges, and opportunities.** *Transport Policy*, v. 99, p. 77–89, 2020.
- SANTOS, M.; ALMEIDA, J. **Hybrid multicriteria models for sustainable transport in infrastructure planning: an integrated CRITIC–WISP approach.** *Journal of Urban Mobility*, v. 7, p. 44–59, 2023.
- SANTOS, M.; CARVALHO, F. **Systems thinking and multicriteria modeling for risk assessment in emerging aviation infrastructures.** *Systems*, v. 10, n. 3, p. 75–92, 2022.
- SANTOS, M. *et al.* **Decision frameworks for UAM corridor design using hybrid MCDA techniques.** *Digital Aviation Journal*, v. 2, n. 1, p. 1–16, 2024.
- STANUJKIĆ, D. *et al.* **The Weighted Influence Superiority and Inferiority Ranking Method (WISP).** *Facta Universitatis – Series Mechanical Engineering*, v. 19, n. 3, p. 447–463, 2021.
- WU, Z. *et al.* **Urban air mobility network design and demand forecasting.** *Engineering*, v. 7, n. 8, p. 1101–1115, 2021.
- XU, Z.; LIU, F.; ZHANG, Y. **Objective weighting based on entropy and CRITIC for multicriteria decision-making.** *PLOS ONE*, v. 15, n.